

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

**Ing. Martin SLANÝ**

**STUDIUM ÚČINKŮ PASIVNÍCH SILOVÝCH SLOŽEK  
ŘEZÁNÍ NA OBRÁBĚNÝ POVRCH**

**An experimental study of the impact of passive forces of cutting  
on a machined surface**

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Strojírenská technologie

Školitel: prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.

Oponenti:

Datum obhajoby:

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Pasivní síly, vystružování, vystružovací hlavice MT3, integrita povrchu, silové zatížení

## **KEYWORDS**

Passive force, reaming, reaming head MT3, surface integrity, force load

## **MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE**

Areálová knihovna Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně  
Technická 2896/2, 616 69 Brno

© Martin SLANÝ, 2013  
ISBN 80-214-XXXX  
ISSN 1213-4198



# OBSAH

OBSAH.....	4
1 ÚVOD.....	5
2 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE .....	6
3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....	6
4 TEORETICKÁ VÝCHODISKA .....	7
4.1 Hodnocení silového zatížení v procesu řezání.....	8
4.2 Metody měření a hodnocení silových složek.....	9
4.3 Vliv opotřebení na velikost silových složek .....	9
4.4 Rozměrový účinek .....	10
4.5 Integrita povrchu .....	11
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	12
5.1 Nástroj pro realizaci experimentálního měření.....	13
5.2 Geometrie nástroje .....	14
5.3 Stanovení hodnoty minimální šířky záběru ostří .....	15
5.4 Definování problému .....	16
5.5 Strukturovaný rozbor záznamu procesu vystružování.....	17
6 HODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ .....	17
6.1 Hodnocení profilu povrchu u testovaných vzorků.....	20
6.2 Hodnocení vzniklého opotřebení na nástroji MT3 .....	21
6.3 Hodnocení opotřebení na vodítkách nástroje MT3.....	21
7 ZÁVĚR.....	22
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	25
CURRICULUM VITAE.....	29
ABSTRAKT .....	31

# 1 ÚVOD

Neustále se zvyšující nároky na ekonomičnost a současně na kvalitu obrobku, tedy převážně na vlastnosti funkčních obrobených povrchů, si žádají neustálé vyvíjení moderních řezných materiálů, povlaků a geometrií, určených především k obrábění vysoce pevných, tvrdých i houževnatých materiálů.

Velké množství nově vyvíjených nástrojů nevytěží maximum ze svého potenciálu a jejich uživatelé se následně v praxi potýkají s jejich nedostatky. Aby bylo možné těmto nedostatkům v budoucnu předcházet, je již ve stadiu vývoje třeba se hlouběji zabývat základními fyzikálními jevy ovlivňujícími mechanismy odebírání materiálu při obrábění a vznik struktury nového povrchu.

Dosavadní výzkumy týkající se oblasti testování řezných nástrojů se zaměřují zejména na působení aktivních sil, určujících celkové namáhání nástroje, jeho deformaci, potřebný výkon pro obrábění atd. V hodnotě celkového silového zatížení nástroje jsou však zahrnuty i pasivní silové složky, které se sice přímo nepodílí na tvorbě třísky, avšak velmi významně ovlivňují výsledný povrch a také hrají velmi významnou roli při zavádění nástroje do řezu. Nejvýraznější působení pasivních silových složek se vyskytuje především u dokončovacích operací, jako je například honování, lapování, superfiniš, broušení, ale také se významně podílí na vzniku nového povrchu při obrábění nástroji s definovanou geometrií břitu, jako je například vystružování. Lze konstatovat, že nárůst pasivních silových složek velmi úzce souvisí s geometrií nástroje a průřezu odebírané třísky  $A_D$ . Nárůst vlivu pasivních sil je možno zaznamenat dále také s rozvíjejícím se opotřebením nástroje od chvíle, kdy se začnou tvořit hřbetní fazety opotřebení. V konečné fázi životnosti břitu vlivem opotřebení pak velikost pasivních sil může až o 300 % převýšit síly aktivní [6, 7, 8].

Mimo nebezpečí poškození řezných nástrojů různými mechanismy opotřebení, ovlivňují pasivní síly také tření nástroje o obrobený povrch a podílejí se tedy na konečné kvalitě obrobeného povrchu, kterou je možno vyjádřit zejména morfologií a drsností, velikostí zpevnění, zbytkovou napjatostí a korozní odolností. Uvedené vlastnosti je možné potom shrnout do sjednocujícího pojmu integrity povrchu. V oblasti styku hřbetu nástroje s obrobeným povrchem dochází k trojosé napjatosti [9, 23, 24, 34].

Tento jev je dosud málo probádán, ačkoliv důležitost jeho studia stále vzrůstá, a to nejen v závislosti na zvyšujícím se počtu aplikací austenitických a duplexních ocelí, ale také v závislosti na stále častějším obrábění nástrojových ocelí v zušlechťeném stavu a zvyšujícími se požadavky na snižování hmotnosti dílců v leteckém průmyslu apod.

Obrábění takovýchto vysoce-pevných materiálů může vést k degradaci kvality povrchové vrstvy, odpevnění zušlechtěné matrice anebo ke vzniku povrchových trhlin a tím pádem i zkrácení životnosti dané součásti nebo přímo k výrobě neshodných kusů [1, 33].

## **2 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE**

Cílem této dizertační práce je studium vlivu pasivních silových složek na integritu obráběného povrchu a sledování změn od stabilizovaného stavu obrábění, které mohou pasivní síly generovat. Práce by měla přispět danému oboru hlubším rozбором řešené problematiky a z těchto poznatků vyvozovat alternativy pro možné změny v řezné geometrii nástroje a v důsledku k zefektivnění výroby.

Dílčí cíle:

- analýza současného stavu řešené problematiky a rešeršní shrnutí dosavadních výsledků v dané oblasti,
- hlubší rozbor kritérií ovlivňující řezný proces a hodnocení, jaký vliv mají aktivní a zejména pasivní silové složky na zvolená kritéria,
- popis analýzy realizovaného experimentálního měření, kde je předpoklad zhodnocení vlivu pasivních sil na obráběný povrch.

Lze předpokládat, že dosažené výsledky popíší možné děje, ke kterým dochází zejména při zavádění osového nástroje do obráběného materiálu. Současný stav, kdy je znám pouze fakt, že právě tato oblast může ovlivnit geometrické parametry nově vzniklého otvoru, bude rozšířen o nové znalosti a závěry, na základě kterých bude možné lépe optimalizovat nástrojovou geometrii, ale také konstrukci upínacího mechanismu nástroje i obrobku. Pochopení a analyzování právě těchto dějů může mít rozhodující vliv na konstrukční řešení nové generace nástrojů typu MT3.

## **3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY**

Proces obrábění kovů provází řada jevů, jejichž mechanismy se zabývají badatelé již od počátku vývoje [26, 27]. Přesto se tento proces dosud nepodařilo popsat a vysvětlit v celé jeho komplexitě [21].

Problematická je v tomto ohledu zejména neznalost všech faktorů ovlivňujících řezný proces a působících na systém stroj-nástroj-obrobek-přípravek. Tyto faktory způsobují mechanické, teplotní i tribologické změny na břitu nástroje a vedou k jeho zatěžování. Pokud toto zatížení překročí únosnou mez, dojde k plastické deformaci nebo lomovému porušení břitu [6, 23, 24, 34, 36]. Nejběžnějšími typy opotřebení nástroje jsou podle Shawa [33] adhezivní opotřebení, abrazivní opotřebení, difuzní opotřebení, vznik oxidační rýhy a v případě povlakovaných nástrojů delaminace povlaků [33].

Druhy opotřebení jsou přitom jen jedním z parametrů, které lze během procesu obrábění sledovat. Dále v této souvislosti můžeme hovořit o trvanlivosti nástroje, jakosti obrobeného povrchu a chování materiálu za extrémních podmínek zatěžování, jimž je materiál při řezání vystaven [12, 21]. Tyto parametry se dají shrnout pod souhrnným názvem integrita povrchu, která bude blíže popsána v teoretické části [2, 3].

V současné době se mnoho autorů zkoumajících danou oblast nebo její dílčí části ve svých publikacích zaměřuje na měření a popis silového zatížení ve snaze optimalizovat řezný proces [23 – 25, 28, 29, 31]. Většina badatelů se však věnuje téměř výhradně aktivním složkám výsledných sil, zatímco pasivní silové složky bývají často opomíjeny, ačkoliv jejich vliv na integritu obráběného i výsledného obrobeného povrchu je značný. Oblasti vlivu pasivních silových složek se ve svých dílčích výzkumech věnuje například autorská dvojice Kopač, Stoić [16], respektive Kopač, Stoić, Lucić [17, 18], kteří se zabývají dynamickou nestabilitou procesu tvrdého soustružení, v Polsku pak Jemielniak [13], který se ve svých člancích věnuje hrubovacímu a dokončovacímu soustružení.

Souhrn dosavadních poznatků o vlivu pasivních silových složek na proces obrábění a na integritu výsledného obrobeného povrchu autor práce v literatuře zaznamenal pouze v omezené míře. Nalézt lze pouze popis jejich vlivu při dokončovacích operacích, například lapování, honování, superfinišování, případně broušení, kde je jejich podíl výrazný.

## 4 TEORETICKÁ VÝCHODISKA

Tato kapitola v dizertační práci popisuje problematiku procesu řezání a principy vzniku a úběru třísky a jevů, které tento děj doprovází. Sem patří například definice procesu řezání, vliv úhlu sklonu roviny maximálních smykových napětí, procesy ke kterým dochází v obráběném materiálu, jako je zpevňování a odpevňování povrchu materiálu a také vliv řezné geometrie nástroje na tvorbu a odvod třísky. V kapitole jsou vybrány a podrobněji popsány technologie, u kterých se na utváření třísky, přechodové plochy a nového povrchu výrazným způsobem podílí pasivní silové složky.

Proces řezání je v literatuře [4, 5, 9, 33] popsán jako proces intenzivní plastické deformace podél roviny maximálních smykových napětí, při němž je materiál obrobku oddělován ve tvaru třísek. Při řešení problémů v této oblasti je ovšem třeba vycházet především z dostupných teoretických poznatků o tomto procesu. Podle Bumbálka [4, 5] jsou zapotřebí například znalosti silových složek  $F_c$ ,  $F_f$ ,  $F_p$  geometrie nástroje, řezných podmínek, teplotních podmínek (ve vztahu k obráběnému materiálu) a podobně [13, 21].

Kovár [21] ve své práci uvádí zejména nutnost využívání poznatků z metalurgických procesů, jakožto spojovacích článků napomáhajících objasnění fyzikální podstaty procesu řezání. Uvádí také, že právě krystalická stavba materiálu, chemické složení, rozměr zrna, vměstky a nečistoty jsou podstatnými determinanty rozhodujícími o výsledku deformace. Vlivy těchto faktorů se projevují v pohybu dislokací i v interakcích mezi nimi a následně v tvorbě místních defektů a trhlin, které mohou vést až k vytvoření křehkého lomu [5, 21, 33]. Z uvedeného vyplývá, že pro určení nejvhodnějších podmínek pro konkrétní model obrábění se je třeba opřít jak o znalosti fyzikálně mechanických i metalurgických vlastností materiálů obrobku, tak o znalost řezných podmínek. Na základě sumy získaných informací z těchto oblastí je možno stanovit obrobiteľnosť, řezivost a fyzikálně metalurgické stavy nového povrchu. V řezném procesu se tyto vlastnosti projeví na:

- aktivních i pasivních silových složkách,
- tvaru třísky,
- plastické deformaci včetně deformační rychlosti,
- délce styku třísky s čelem nástroje,
- teplotě řezání atd. [4, 5, 21].

#### 4.1 HODNOCENÍ SILOVÉHO ZATÍŽENÍ V PROCESU ŘEZÁNÍ

V procesu obrábění je možné na řezném nástroji definovat dva základní druhy silových složek - aktivní a pasivní. Jedná se o průvodní veličiny řady mechanických technologií, při kterých dochází k přeměně mechanicky vykonávané práce [9, 29, 32, 33, 35].

Při obrábění je zatížení řezného nástroje realizováno zejména působením odporu obrobku ( $R$ ) proti břitu nástroje. Celkové síly ( $F$ ) působící na řezný nástroj je možné vyjádřit v různě orientovaných kartézských souřadných systémech. Například se jedná o:

- souřadný systém řezného nástroje ( $F_\gamma, F_{\gamma N}, F_p$ ),
- kartézský souřadný systém měřicí aparatury ( $F_x, F_y, F_z$ ),
- souřadný systém obráběcího stroje ( $F_x, F_y, F_z$ ).

**Aktivní složky silového namáhání břitu ( $F_c, F_f$ )** - při obrábění jsou spojeny zejména s úběrem materiálu (tj. průřezem třísky a specifickým měrným odporem, resp. měrnou řeznou silou) a řeznou  $v_c$  (posuvovou  $v_f$ ) rychlostí. Podílejí se na výkonech a pracích, spojených s přeměnou odebíraného materiálu na třísku [29, 32, 33, 35].



**Pasivní složky silového namáhání břitu** při obrábění (značeny obvykle  $F_p$ ) jsou takovým namáháním břitu nástroje, které sice s tvorbou třísky souvisí, ale nástroj se ve směru silového působení relativně nepohybuje, tudíž tyto síly nekonají přímo žádnou práci. Bývají to obvykle komponenty ortogonální k  $v_c$  i  $v_f$  [29, 32, 33, 35].

Celková síla  $F$  je tedy rozložena na jednotlivé silové složky  $F_c$ ,  $F_f$ ,  $F_p$  [37, 38] a lze je pak u nástroje využívajícího pro proces řezání řezný klín s definovanou geometrií stanovit z empirických vztahů uvedených v dizertační práci s označením (4.18-4.20). Velikost silového zatížení je při procesu obrábění uváděna v [N].

## **4.2 METODY MĚŘENÍ A HODNOCENÍ SILOVÝCH SLOŽEK**

Silové zatížení a složky výslednice silového zatížení je možné hodnotit na úrovni empirických výpočtů, případně lze využívat simulace řezného procesu s využitím např. metody konečných prvků (MKP) nebo je lze zaznamenávat z realizovaného experimentu s využitím měřicích aparatur. Aparatury pro měření složek silového zatížení se nazývají dynamometry a v současné době jsou konstruovány zejména na principu hodnocení změny náboje na deformovaných krystalech (piezoelektrický jev), případně na principu změny indukce snímače. Uvedenou problematikou se zabývá kapitola 4.3 v dizertační práci.

## **4.3 VLIV OPOTŘEBENÍ NA VELIKOST SILOVÝCH SLOŽEK**

Během procesu obrábění je břit namáhán na kontaktních plochách silově, tepelně a chemicky. Tyto vlivy mají za následek rozvoj opotřebení na nástrojových plochách, zejména pak na čelní ploše  $A_\gamma$ , hřbetní ploše  $A_\alpha$ , na vedlejší hřbetní ploše  $A_{\alpha'}$ , na špičce a na břitu nástroje. Jedná se o běžný jev, kterému není možno zabránit, ale lze jej úpravou řezného prostředí, změnou řezných podmínek, změnou geometrie nástroje apod. účinně redukovat. Základní typy opotřebení je možné rozdělit do těchto základních kategorií:

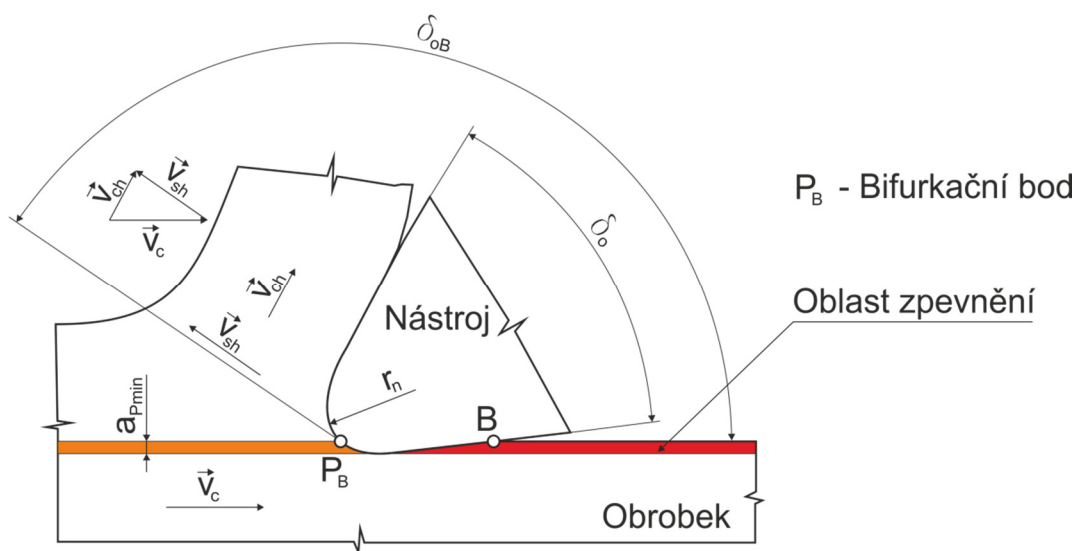
- mechanické,
- mechanicko-tepelné,
- chemicko-tepelné,
- chemické [9, 12, 14, 33, 35].

Podrobnější popis mechanismů opotřebení a vliv na změnu velikosti silových složek uvádí kapitoly 4.5.1 – 4.5.3 v dizertační práci.

## 4.4 ROZMĚROVÝ ÚČINEK

Zejména u dokončovacích metod obrábění, kde uvažujeme tvorbu malé třísky a přitom jsou kladeny vysoké nároky na výsledný obrobený povrch, jak z hlediska geometrické, tak i rozměrové přesnosti, je třeba brát v úvahu vliv tzv. rozměrového účinku. Rozměrový účinek je možné definovat jako poměr poloměru zaoblení ostří  $r_n$  a hloubky odebíraného materiálu  $a_p$ . Jinými slovy je možné vliv rozměrového účinku popsat také jako poměrný růst měrné řezné energie a řezného odporu v závislosti na zmenšující se šířce záběru ostří.

Rozměrový účinek tak velmi úzce souvisí s předpokladem, že existuje hodnota šířky záběru ostří, při které bude nástroj s obráběným povrchem v kontaktu, bude v povrchové vrstvě materiálu vyvolávat změny, ale nebude docházet k přetvoření materiálu do formy třísky. Bude tedy docházet k přechování povrchu v oblasti plastických i elastických deformací, což pak povede k vnášení zbytkových napětí do povrchu, která budou mít převážně charakter tlakových napětí. V souvislosti s minimální hloubkou řezu lze na zaoblení břitu identifikovat tzv. bifurkační bod, který lze volně přeložit jako bod zvratu. Ten pak lze definovat jako bod, ve kterém bude docházet vlivem působení silového zatížení generovaného zrnou struktury materiálu k rozdělování vývoje původního směru působící síly a k vytváření dvou nových odlišných struktur, které se liší svou kvalitou a vlastnostmi [2, 3, 22, 30, 33, 35].



Obr. 4.1. Znáznornění vlivu minimální šířky záběru ostří a změny řezné geometrie v bodě bifurkace dle [14, 21].

Pokud je šířka záběru ostří menší, než je výška bifurkačního bodu měřená od zadní roviny  $P_B$ , pak bude docházet k hrnutí a přechování materiálu pod břit nástroje. To také bude na hřbetě nástroje generovat výrazné pasivní síly, které mohou vést ke zrychlenému hřbetnímu opotřebení a také k vytváření tepla,

kteřé bude koncentrováno nástrojem a částečně odváděno plochou obrobku. Řezné síly jsou v tomto případě minimální (obr. 4.1., v dizertační práci označen jako obr. 4.16) [2, 3, 22, 30, 33, 35].

Při zvýšení hodnoty  $a_p$  nad bifurkační bod bude materiál nad tímto bodem utvářen ve formě třísky a materiál pod tímto bodem bude přechován do obráběného povrchu. Vlivem rozměrového účinku pak může docházet k váznutí materiálu před zaoblením  $r_n$ , což se může projevit i jako prodloužení ostří nástroje (v dizertační práci uvedeno na obr. 4.17.) [2, 3, 22, 30, 33, 39].

Rozměrový účinek se nemusí projevit pouze u operací s malou hloubkou třísky, ale také u operací, kde se mění průřez třísky v rovině  $P_f$ . V takovémto případě se projeví jako změna měřné řezné energie nerovnoměrně rozložené po délce ostří v současném záběru. Tříska pak může mít ve svém průřezu proměnlivou hodnotu zpevnění. Tento jev se také projeví na ostří nástroje, kde bude docházet k nerovnoměrnému zatěžování a může docházet ke vzniku různých typů opotřebení vlivem odlišných působících vlivů (**obr. 5.10.**).

#### 4.5 INTEGRITA POVRCHU

Integrita povrchu je definována jako soubor všech faktorů, které popisují vlastnosti obrobeného povrchu, sem patří například hodnocení profilu povrchu, mikro tvrdost anebo průběh zbytkových napětí v povrchové vrstvě [15].

Do současné doby neexistuje komplexní popis celkového hodnocení nově vytvořené plochy, a tak je třeba hodnotit jednotlivá kritéria integrity povrchu individuálně s ohledem na funkci povrchu. Pro komplexní hodnocení integrity povrchu lze vytvářet závěry z dlouhodobých zkoušek, které se běžně provádí u bezpečnostně interesovaných součástí například v leteckém nebo automobilovém průmyslu. Nejspolehlivější metodou ověřující veškeré parametry zahrnující funkční vlastnosti obrobeného povrchu však stále zůstává těžký provoz, ve kterém je povrch přirozeně zatěžován. Integritu povrchu lze hodnotit dle uvedených vstupních parametrů:

- údaje o textuře a profilu povrchu,
- geometrické parametry povrchu,
- poruchy na povrchu způsobené obráběcí operací,
- mikro tvrdost jednotlivých podpovrchových vrstev,
- hodnoty mikrostruktury zohledňující funkční vlastnosti povrchu,
- fázová transformace struktury povrchu během procesu obrábění,
- zbytková napětí v povrchu vnesená obráběcí operací [2, 4].

Blíže je tato problematika rozepsána v kapitole 4.9 – 4.11 v dizertační práci.

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části se dizertační práce zabývá vlivy silového zatížení při obrábění na rozvoj opotřebení nástroje a integritu obráběného a výsledného obrobeného povrchu, zejména pak bude zaměřena na důsledky působení pasivních silových složek  $F_p$  na obráběný povrch.

Výzkum se zaměřuje především na hodnocení operace přesného vystružování s využitím moderní vystružovací hlavice MT3 firmy HAM-FINAL s.r.o. určené pro řezné rychlosti až  $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . Tento nástroj je určen pro dosahování stabilnější geometrické a rozměrové přesnosti obrobených děl, běžně IT 5 – IT 6, a pro snižování nákladů výrobní dávky. S vývojem nových vystružovacích hlavice se však objevují nové problémy s pasivními silovými složkami vznikajícími vlivem rozvoje opotřebení na břitech a dále také na vodítkách nástroje. Aktivní síly jsou u těchto nástrojů dobře zajištěny použitým nástrojovým materiálem, jako například cermety, KNB, PKD nebo SK opatřenými tvrdými otěruvzdornými PVD povlaky. Tyto problémy se řeší zejména aplikací inertních nástrojových materiálů a dále použitím duplexních a triplexních PVD povlaků [29].

Analýzy jsou prováděny zejména na základě hodnocení průběhu silového zatížení během procesu vystružování, přičemž hlavní oblastí zájmu bude zavádění a prvotní zařezávání nástroje do materiálu.

Analýzy se dále zaměří na:

- hodnocení vlivu řezné geometrie na velikost silových složek,
- vliv velikosti silových složek na kontinuitu a stabilitu vystružovací operace,
- na průběh nárůstu pasivních sil na sestavu nástroj – upínač,
- vliv procesní kapaliny na průběh vystružování,
- na analýzu výsledného povrchu a hodnocení výhod a nevýhod plynoucích z použité nastavené řezné geometrie.

Jako zásadní pro správné vedení a tím i stabilní průběh vystružování se jeví právě oblast prvotního zařezávání nástroje do obrobku. V časovém úseku zařezávání dochází k interakci několika vlivů, které mohou vést k nežádoucímu narušení vstupní geometrie otvoru, která zajišťuje vedení nástroje v další fázi vystružování.

Cílem této práce pak bude na základě teoretických i praktických poznatků navrhnout možné alternativy úpravy nástroje MT3.

**Stanovených cílů bude dosaženo na základě těchto kroků:**

- podrobení vystružovací hlavice MT3 geometrické analýze (ve spolupráci s výrobcem),
- stanovení silového zatížení a řezného momentu generovaného břity při nájezdu nástroje do řezu u vyvrtané díry za využití měřicí aparatury Dynamometr KISTLER typ. 9272,
- hodnocení profilu nově vzniklého povrchu, s ohledem na opotřebení nástroje,
- zkoumání vlivu rozvoje opotřebení na nárůst silového zatížení a vyhodnocení vlivu pasivních silových složek na obrobený povrch.

Podmínky pro realizaci experimentu jsou uvedeny v dizertační práci v kapitole 5.1 a následných podkapitolách.

## **5.1 NÁSTROJ PRO REALIZACI EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ**

Pro testy je zvolena moderní vystružovací hlavice MT3 patentovaná firmou HAM-FINAL ( Obr 5.1, v dizertační práci označen jako obr. 5.5). Tento typ nástroje se vyrábí a dodává v provedení:

- monolitní (SK – v současné době již omezeně),
- cermetové (hlavice nástroje z cermetu),
- s pájenými břity a vodítky do SK matrice (břity – cermet, vodítka – cermet nebo PKD)

Pro experiment byly využity nástroje s pájenými břity a vodítky. Pro vzorky MCI byl použit nástroj s břity i vodítky z cermetu a pro vzorky označované MDi a Wi byl použit nástroj s břity z cermetu a vodítky z PKD.

Všechny vystružovací hlavice typu MT3 jsou opatřeny PVD (Physical Vapour Deposition) povlaky s ohledem na malé hodnoty poloměru zaoblení ostří  $r_n = 3 - 5 \mu m$ .

Nástroj je opatřen třemi břity a dvěma vodítky. Plocha mezi vodítky slouží jako technologická základna pro kontrolu a měření průměru výstružníku. Toleranční pole vystružené díry je dle výrobce v rozmezí IT 5 – IT 6. Parametry profilu povrchu se pohybují pro  $Ra = 0,4 - 0,8 \mu m$  [19].

Pro experiment byl vybrán nástroj s povlakem AlTiSiN a TiAlN, nanášeným metodou PVD.

Zařezávání jednotlivých břitů probíhá v pořadí dle obr. 5.2 (v dizertační práci na obr. 5.6.). Jako první se do obrobku zařezává břit číslo 1, následně břity 2 a 3. Vlivem rozmístění břitů pouze na jedné polovině obvodu může docházet při zařezávání k vychylování nástroje z osy obrábění a vzniku vibrací. Po zařezání všech třech břitů se do procesu zapojují protilehlá vodítka, která nástroj stabilizují a břity podporují do řezu.

Tento sled probíhá řádově během několik desítek milisekund, avšak z obr. 5.14. je patrné, jak právě v 1. fázi vystružování dochází k nárůstu posuvové silové složky  $F_f$  a řezného momentu  $M_c$  a současně k postupné stabilizaci řezného procesu a poklesu měřených hodnot.



Obr. 5.1. Vystružovací hlavice MT3 podle [20].



Obr. 5.2. Postup zavádění břitů do řezu.

## 5.2 GEOMETRIE NÁSTROJE

Geometrie vystružovací hlavy je specifická svou patentovanou konstrukcí [10]. Břity umístěny v jedné polovině obvodu nástroje jsou rozděleny a konstruovány tak, aby při doporučeném posuvu odebíraly každý stejný průřez třísky  $A_D$ . Hodnota posuvové rychlosti je velmi limitující pro schopnost nástroje dosahovat uváděné parametry povrchu. Na tuto hodnotu navazuje překrývání břitů v rámci jedné otáčky. Při nevhodném nastavení hodnoty  $f_{ot}$  může dojít k vytvoření nežádoucí struktury

povrchu, která by mohla kolidovat s navazujícími vodítky nástroje. Důsledkem by mohlo být v krajním případě zadírání vodítek a tvorba nežádoucí struktury povrchu. Změna posuvu v závislosti na překrývání břitů nástroje je uvedena v dizertační práci na obr. 5.7. Trasování uvažovaných bodů ostří 1-3 v rámci dvou otáček je uvedeno v dizertační práci na obr 5.8.

Konstrukce břitu nástroje je koncipovaná tak, aby docházelo k postupnému nárůstu silového zatížení s narůstající hodnotou  $A_D$ . Z násobného zalomení břitu nástroje však lze předpokládat skokové nárůsty hodnot silových složek, což může vést ke vzniku zákmitu nástroje. Tato oblast nárůstu hodnoty  $A_D$  je kritická, a to až do hodnoty  $A_{Dmax}$ , při které je již průřez třísky konstantní po celou dobu vystružování. Tento druh zatížení břitu při nárůstu hodnot  $A_D$  v počátku řezání nástroje může způsobovat nerovnoměrné opotřeбенé břitu a také nerovnoměrné teplotní pole na nástroji, kde lze předpokládat rozvoj nežádoucího druhu opotřeбенí na břitu nástroje.

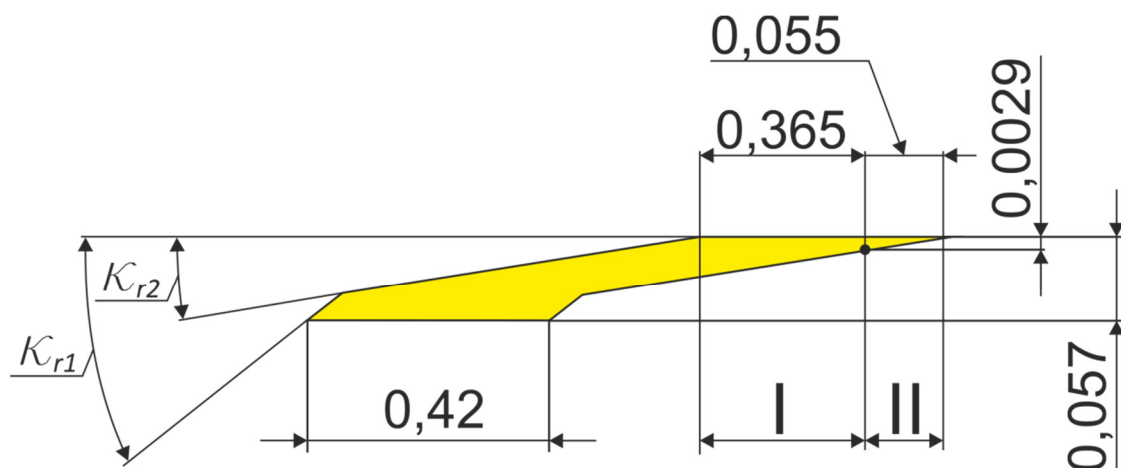
Nárůst hodnoty průřezu třísky  $A_D$  je v tomto případě vhodné vyjádřit jako funkci času. Při dosažení maximálního průřezu třísky  $A_{Dmax}$  k dalšímu růstu nedochází, ale v uvedeném průřezu (v dizertační práci uveden na obr. 5.10.) dochází k nerovnoměrnému silovému zatížení po celé ploše.

Na tomto nerovnoměrném zatížení se v koncové části průřezu třísky začne projevovat vliv rozměrového účinku. Zde pak působí výrazné pasivní síly, které mohou mít za následek zpevnění povrchu, ale také takto přechovaný povrch může vykazovat zásadní odlišnosti od povrchu, který byt vytvořen řezáním. Povrch je v této oblasti namáhán v oblasti elastických deformací. Rozvoj průřezu třísky v závislosti na čase je v dizertační práci podrobněji popsán v kapitole 5.3.1 a odvozen v kapitole 5.3.2.

### **5.3 STANOVENÍ HODNOTY MINIMÁLNÍ ŠÍŘKY ZÁBĚRU OSTŘÍ**

V dizertační práci je tato problematika uvedena v kapitole 5.3.4, kde je současně spočtena a uvedena hodnota  $a_{pmin}$ . Na základě uvedené hodnoty je odvozena délka břitu nástroje, kde se nebude materiál přetvářet ve formě třísky, ale bude se zde již projevovat výhradně rozměrový účinek a materiál bude přechován do obráběného povrchu. Uvedené hodnoty jsou uvedeny na obr. 5.3. (v dizertační práci na obr. 5.13.).

Na základě výpočtu hodnoty  $a_{pmin}$  lze konstatovat, že na břitu nástroje lze identifikovat dvě oblasti s odlišným mechanismem utváření třísky. V oblasti I bude převažovat řezný účinek a v oblasti II se projeví vliv rozměrového účinku. Délka plochy, na které se projeví vliv rozměrového účinku je rovna  $l_{rn} = 0,055 \text{ mm}$ .



I - obráběný povrch s projevem řezného účinku generovaného jedním břittem  
 II - obráběný povrch s projevem rozměrového účinku generovaného jedním břittem

Obr. 5.3. Grafické znázornění oblasti břitu nástroje s odlišným působením na obráběný povrch v rámci jednoho břitu nástroje.

## 5.4 DEFINOVÁNÍ PROBLÉMU

Během nájezdu vystružovací hlavičky do řezu lze předpokládat nárůst pasivních silových složek v několika fázích (podrobněji rozepsaných v dizertační práci v kapitole 5.5), které mohou zásadně ovlivňovat obráběný i výsledně obrobený povrch. Vlivem rozměrového účinku nástroje v průběhu několika mikrosekund při zařezávání dochází k nárůstu pasivních sil, což může mít za následek vychylování nástroje z osy obrábění a generování kmitů, které mají nepříznivý vliv na výsledný obrobený povrch a na rozvoj opotřebení nástroje. Tyto pasivní síly budou narůstat až do doby dosažení hodnoty  $a_p$  odpovídající bifurkačnímu bodu [29].

Nad bifurkačním bodem je materiál přechován v oblasti primárních a sekundárních plastických deformací a odchází ve formě třísky. S ohledem na rozložení břitů na nástroji MT3 k tomuto procesu dojde opakovaně, přičemž výslednice všech  $F_{pi}$  bude osově nevyvážená.

V oblasti zařezávání pak lze předpokládat tři skokové nárůsty řezných i pasivních silových složek, které mohou zapříčinit nestabilitu řezného procesu. Pro stabilizaci je nástroj opatřen dvěma vodítky, která generují pouze pasivní síly, tangenciální síly se budou blížit nule.

Ke stabilizaci nástroje dochází v okamžiku zařezání všech břitů nástroje v plné akční délce a zavedení obou vodítek.

Vznesené předpoklady jsou experimentálně ověřeny a hodnoceny v dizertační práci v kapitole 6.



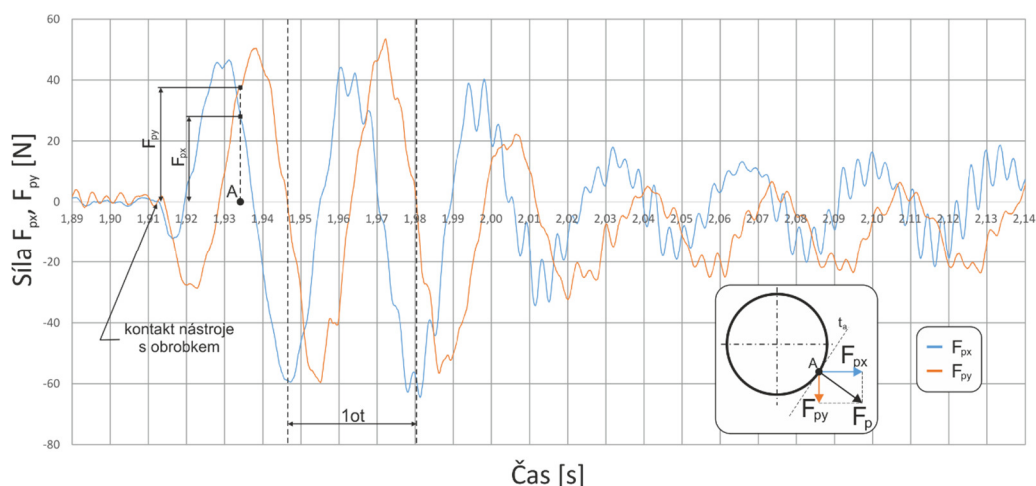
## 5.5 STRUKTUROVANÝ ROZBOR ZÁZNAMU PROCESU VYSTRUŽOVÁNÍ

Na základě přesného rozfázování jednotlivých dějů v závislosti na čase a řezných podmínkách lze ze záznamu hodnot velmi přesně stanovit, jak se nástroj v daný okamžik choval. Na základě rozboru realizovaných měření lze poté jednotlivé časové úseky separovat a podrobit analýze, jejímž cílem je daný děj matematicky kvantifikovat a vytvořit předpoklady pro chování nástroje během celé jeho životnosti. Na obr. 5.18. uvedeném v dizertační práci jsou šipkami vyznačeny jednotlivé časové horizonty, ve kterých dochází ke změně stavu procesu vystružování.

Ve vyznačených bodech dochází k dějům, které se podílí na celkové stabilitě a kontinuitě vystružovacího procesu. Jednotlivé děje se také mohou projevit na výsledné kvalitě a integritě nově vyrobeného povrchu. Body na obr. 5.18. v dizertační práci jsou podrobněji popsány v tab. 5.5., uvedené v kapitole 5.6 v dizertační práci.

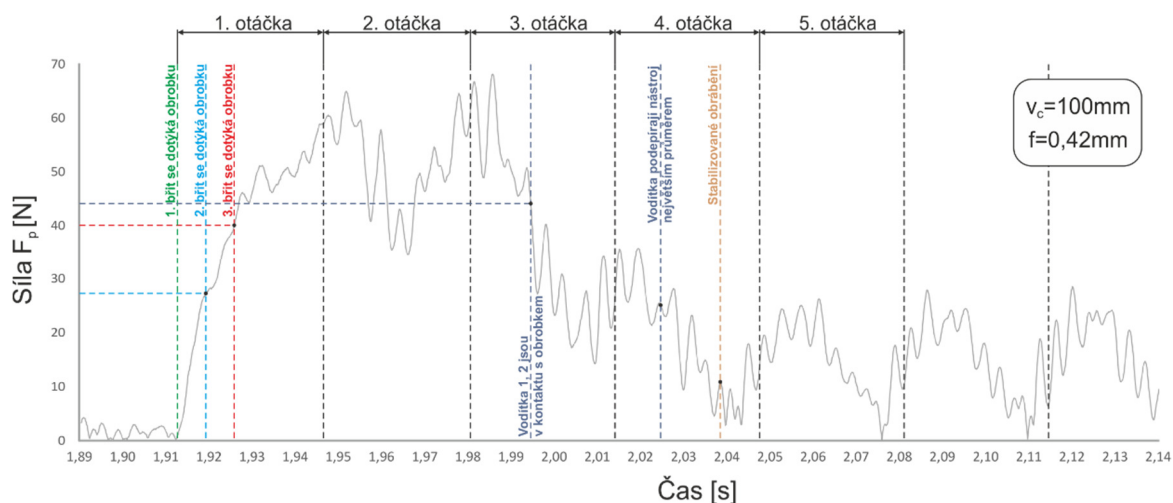
## 6 HODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ

Hodnocení realizovaného experimentálního měření se zaměří v první fázi na zjištění stavu pasivních silových složek při vystružování. Hodnocena bude výlučně oblast zařezávání nástroje do obrobku. V této oblasti bude sledován nárůst složek pasivní síly v osách X a Y a následně budou přepočteny na výslednou sílu působící v radiálním směru na nástroj. Na obr. 6.1. je znázorněn záznam silových složek  $F_{px}$  a  $F_{py}$  při prvním kontaktu nástroje a obrobku.



Obr. 6.1. Záznam silových složek  $F_x$  a  $F_y$  při prvotním kontaktu nástroje a obrobku.

Z jednotlivých silových složek byla vyvozená výslednice pasivní silové složky, která je zanesena do grafu na obr. 6.2 (v dizertační práci na obr 6.3).



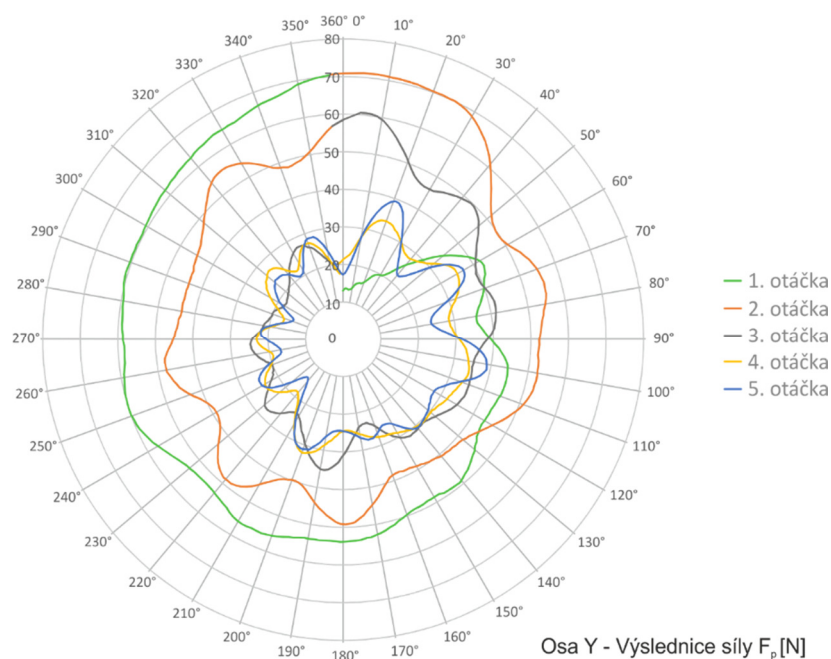
Obr. 6.2. Přepočet složek  $F_{px}$  a  $F_{py}$  na hodnoty pasivní síly a záznam hodnot v grafu.

Záznam hodnot  $F_p$  popisuje výslednici celkové reakční pasivní síly působící na nástroj v radiálním směru. Na základě časové analýzy záznamu lze identifikovat konkrétní časy, ve kterých se začne projevovat vliv působení následujícího břitu. Při obrábění ve 2. fázi, kdy je nástroj plně v záběru, bude tato síla výslednicí součtu všech pasivních sil generovaných břity i vodítky.

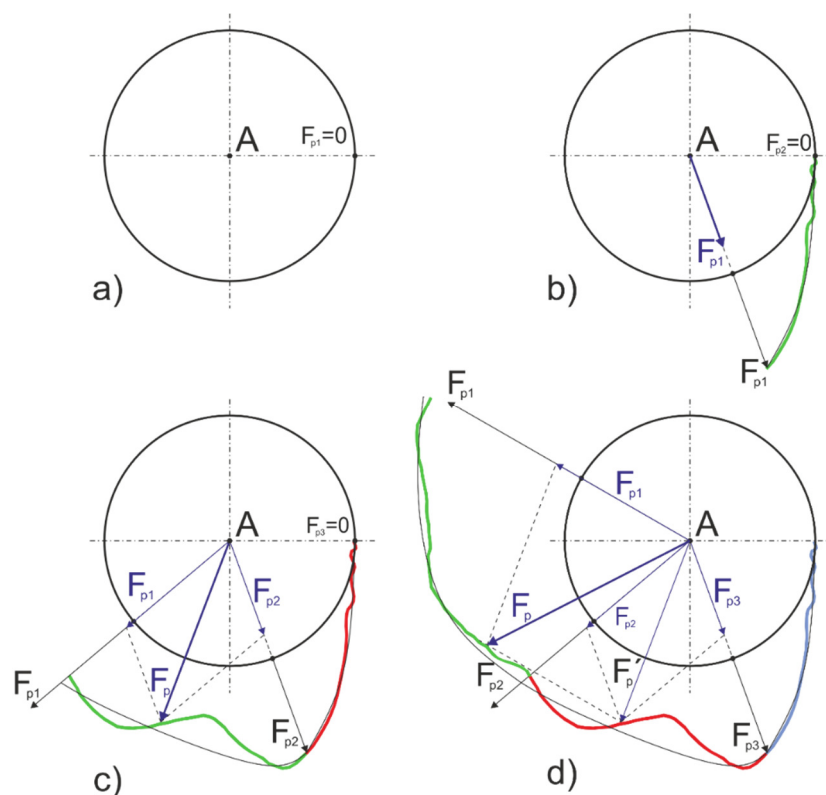
Měřené hodnoty poukazují na skutečnost, že nástroj během celého procesu obrábění je namáhán radiálními pasivními silami, které by u osového nástroje měly být v ideálním případě rovny nule.

Během tohoto procesu síla neustále narůstá na uvedený 2 – 3 násobek hodnot stabilizovaného obrábění. Během druhé otáčky dochází k částečnému vyrovnání osových sil, tedy ke snížení hodnot  $F_p$  avšak ve třetí otáčce dojde opět k nárůstu na původní hodnoty generované nástrojem během první otáčky. Teprve ve čtvrté otáčce se začne nástroj stabilizovat, hodnoty síly  $F_p$  se začnou osově vyrovnávat a v každé další otáčce již oscilují kolem oblasti stabilních hodnot.

Tento poznatek odpovídá základnímu předpokladu konstrukce nástroje, který předpokládá postupnou stabilizaci nástroje v okamžiku zavedení vodítek do vystružovaného otvoru. Vodítka jsou konstruována s jednou lomenou náběžnou hranou, kde menší úhel náběžné hrany podporuje postupnou stabilizaci. Proces stabilizace lze pozorovat na kruhovém grafu v závislosti na úhlu natočení nástroje obr. 6.3 (v dizertační práci značen obr. 6.4). Je třeba mít však na paměti, že výsledná silová složka je složená z výslednice pasivních sil na všech břitech, které jsou současně v záběru (obr. 6.4 v dizertační práci značen obr. 6.5). Dalším podrobným popisem a analýzou průběhu silového zatížení se v dizertační práci zabývá kapitola 6.



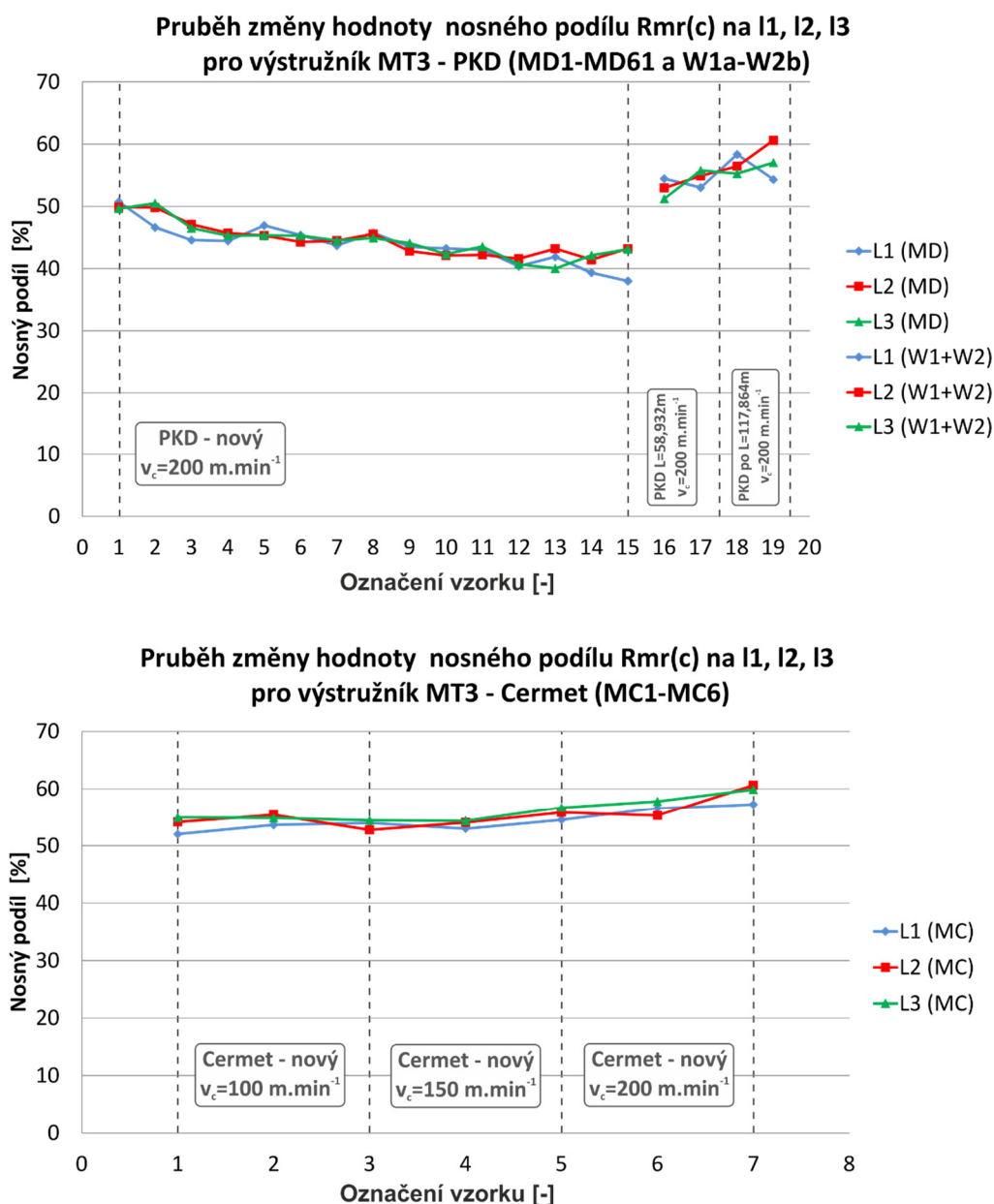
Obr. 6.3. Průběh nárůstu síly  $F_p$  v závislosti na natočení nástroje v jednotlivých otáčkách nástroje v I. fázi obrábění.



Obr. 6.4. Vektorový součet výslednice silové složky  $F_p$ : a) Břit 1 je v kontaktu s obrobkem, b) Vektor síly  $F_p$  má totožný směr normály k bodu kontaktu nástroje s obrobkem, velikost síly odpovídá naměřené hodnotě, c) Síla  $F_p$  je vektorovým součtem výslednic sil  $F_{p1}$  a  $F_{p2}$ , d) Síla  $F_p$  je vektorovým součtem výslednic sil  $F_{p1}'$  a  $F_{p3}$ .

## 6.1 HODNOCENÍ PROFILU POVRCHU U TESTOVANÝCH VZORKŮ

U testovaných vzorků byly naměřeny a vyhodnoceny parametry  $R_a$ ,  $R_v$ ,  $R_p$ ,  $R_z$ ,  $R_{mr(c)}$ . Tyto parametry byly shledány jako popisné pro hodnocení předpokládaného stavu povrchu s ohledem na další použití a funkci. U nástroje MT3 dochází během procesu opotřebení ke změně velikosti těchto hodnot. Kapitola 6.3.1 v dizertační práci dále popisuje naměřené hodnoty a tyto hodnoty jsou vyjádřeny v grafech, na základě kterých byly konstatovány výsledné teze. Na obr. 6.5. (v dizertační práci s označením obr. 6.14.) je uveden příklad grafického vyjádření naměřených hodnot parametru  $R_{mr(c)}$  v měřených hladinách L1 – L3 při zvolených řezných rychlostech.



Obr. 6.5. Průběh hodnot  $R_{mr(c)}$  pro jednotlivé vzorky v L1, L2, L3.

## 6.2 HODNOCENÍ VZNIKLÉHO OPOTŘEBENÍ NA NÁSTROJI MT3

Jak již bylo konstatováno výše, nástroj je konstruován s původním záměrem rovnoměrného rozložení silového zatížení na každý břit. Výsledné dokumentované poznatky však dokládají, že existuje řada aspektů, které zapříčiňují lokální přetěžování jednotlivých břitů a v důsledku zapříčiní jejich postupnou destrukci nejen z hlediska dlouhodobého rovnoměrného rozvoje opotřebení.

Pokud budeme na břit pohlížet jako na oblast, kde s rozvojem času dochází k nárůstu zatížení (kapitola 5.3.2 a kapitola 6 v dizertační práci), pak na základě stanovení měřítka lze určit oblast poškození břitu, korespondující s oblastí největšího zatížení. Kritické opotřebení koresponduje se zjištěnou oblastí největšího zatížení na jednom břitu, kde již dochází k projevům rozměrového účinku. Také při hodnocení povrchu lze prokázat, že úsek poškození na břitu je v zákrytu s II oblastí (dle obr. 5.10. uvedeného v dizertační práci) předchozího břitu, který vlivem působení rozměrového účinku vytvořil zpevněnou oblast na obráběném povrchu v předchozí otáčce. Pakliže břit 1 bude odřezávat tento zpevněný materiál, v kombinaci se zmenšujícím se průřezem třísky, dojde k nárůstu mechanického tlaku na danou oblast břitu a bude docházet k postupnému dynamickému únavovému působení, které vyústí ve vydrolení nebo vylomení břitu. I po takovémto poškození je nástroj schopen obrábět, ale zatížení se postupně přesouvá na následující břit nástroje, zatímco na břitu 1 se vlivem opotřebení budou rozvíjet pasivní síly a narůstá řezný moment. V důsledku poškození břitu 1 a přesunutím části zatížení na následný břit začne docházet k lavinovému efektu, kdy břit 2 bude odebírat zpevněný materiál z povrchu obrobku vniklého po obrobení prvním břitem a takto se bude chovat i závislost mezi druhým a třetím břitem. Rozvoj opotřebení se pak jeví na jednotlivých břitech jako nesymetrický. Pokud se na pozici kritických oblastí opotřebení podíváme z hlediska uvedeného vzájemného překrývání břitů, lze vyzorovat vzájemnou závislost. Profil povrchu s rozvojem opotřebení a nárůstem silových složek začíná vykazovat četnější a výraznější povrchové vady a parametry popisující profil povrchu začnou narůstat. Jak je uvedeno v grafu (v dizertační práci na obr. 6.14.), vzájemný materiálový podíl  $R_{mr(c)}$  narůstá. Nárůst této hodnoty lze nepotvrzeně připsat odlehčovacím břitům, který navazuje na hlavní řeznou část u všech břitů nástroje a jehož opsaný profil tvoří válec. V této oblasti však již nedochází k řezání, ale břit na povrch působí principem známým z VBD s geometrií Wiper ze soustružnických a frézovacích operací. Při rozvoji nárůstu poloměru zaoblení ostří během procesu vystružování na těchto odlehčovacích břitech dochází k zahlazování a zatlačování špiček profilu povrchu.

## 6.3 HODNOCENÍ OPOTŘEBENÍ NA VODÍTKÁCH NÁSTROJE MT3

Dřívější konstrukce nástroje vycházela z hlavního předpokladu jednoduchosti výroby nástroje jakožto monolitního celku z materiálu cermet. Toto řešení bylo v rámci vývoje nástroje nahrazeno osazením vodítek a břitů pomocí technologie

pájení, což vedlo k možnosti využití otěruvzdornějších materiálů s nižším součinitelem tření a s nízkou afinitou vůči obráběnému materiálu. Předpokladem bylo předejít adhezivnímu ulpívání obráběného materiálu na povrchu vodítek. Jako částečné řešení se jevila možnost osazení vodítek materiálem PKD (nástroje pro experimentální hodnocení). I u tohoto materiálu se však s rozvojem opotřebení a lokální ztrátou povlaku nástroje projevují adhezivní principy ulpívání částic materiálu. Pakliže takovýto nárůstek na nástroji vznikne, tak vzhledem ke geometrii vodítka nemá jinou možnost odvodu než do obráběné plochy. Nárůstek je pak při kontaktu s následujícím vodítkem namáhán smykem a dojde k napěchování materiálu do obráběné plochy nebo na něj působí následný břit. U takto ulpělé částice pak nelze předvídat její další chování. Nárůstek pak může odejít ve formě třísky nebo vytvoří lokální zpevnění a vryp na obráběné ploše. Při posuzování pozice nejvíce opotřeбенé oblasti vodítek bylo zjištěno, že se nachází právě ve vzdálenosti korespondující s hodnocenými grafy pasivních sil  $F_p$  v oblasti stabilizování nástroje. Obrazová dokumentace vodítek tedy potvrzuje, že vodítka jsou právě nejvíce namáhána v této fázi obrábění a další rozvoj abrazivního opotřebení je tímto faktem dále podpořen. Touto problematikou se dále zabývá kapitola 6.3.3 uvedená v dizertační práci.

## 7 ZÁVĚR

Operace vystružování se za posledních několik let stala vysoce produktivní. Za použití moderních řezných nástrojů a tvrdých a otěruvzdorných PVD povlaků se podařilo zvýšit řezné rychlosti vhodné pro danou operaci až o desetinásobek. Neustále se zvyšující požadavky na výslednou kvalitu a obecně integritu povrchu nutí výrobce vystružovacích nástrojů neustále se zabývat novými problémy, které s problematikou vývoje nového řezného nástroje souvisejí.

Jak je patrné z výsledků provedených experimentů, nelze vliv pasivních silových složek podceňovat. Mohou být příčinou předčasného lomového poškození břitu nástroje, ale také mohou zásadním způsobem ovlivňovat kvalitu výsledného povrchu a tedy i celého obrobku. U rotačních nástrojů pak mohou přispívat ke vzniku samobuzeného chvění, neboť působí na vnějším obvodu nástroje a tedy mohou v důsledku zvyšovat velikost řezných momentů  $M_c$ . Pasivní silové složky je možno redukovat za využití procesních kapalin nebo za použití tvrdých, případně tribologických povlaků. U testovaného typu nástroje MT3 však při dané konstrukci nelze zajistit osovou silovou vyváženost a z hodnocení průběhu silového zatížení také vyplynulo, že již při zavádění nástroje dojde k lokálnímu přetížení vodítek, které v dané části vodítek způsobí rozvoj abrazivního opotřebení a materiálový úbytek vodítek.

Současným trendem produkční firmy HAM-FINAL s. r. o. je navyšování použitelné řezné rychlosti pro vystružovací nástroje. Měření prokázalo rozdíly v chování nástroje i ve struktuře výsledného povrchu při použití dvou typů materiálů

pro vodítko nástroje. Řezná část je osazena řezným materiálem cermet opatřeným PVD povlakem, zatímco jako materiál vodítek byl u vzorků MCI použit cermet a u vzorků MDI a WI byl použit materiál PKD. Výsledky poukázaly na výraznější změny v měřených hodnotách  $F_p$  a  $M_c$ , ale také v hodnotách zvolených pro hodnocení profilu povrchu u nástrojů s cermetem. Zejména pak parametr  $R_v$  vykazoval narůstající trend hodnot v závislosti na zvyšující se řezné rychlosti. Hodnoty parametru  $R_v$  v měřené oblasti L2 a L3 při  $v_c = 100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  u nového nástroje s cermetem odpovídal hodnotám  $R_v$  při  $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  u nového nástroje s PKD ve stejných oblastech. Výrazný nárůst hodnot  $R_v$  byl zaznamenán u nástrojů s cermetem při  $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , kdy hodnoty ve srovnání s nástrojem s PKD vykazovaly nárůst na 2,6 násobek v uvedené měřené oblasti L2 a L3.

Z hodnocení byly dále zjištěny vyšší hodnoty  $R_v$  v měřené oblasti L1 u nástrojů s cermetem při všech použitých řezných rychlostech, oproti nástroji s vodítky z PKD. Stabilita hodnot  $R_v$  u nástroje s PKD v oblasti L1, L2 a L3 byla v rozmezí 3 %. U nástrojů s vodítky z cermetu se hodnoty oblasti L1 od oblasti L2 a L3 lišily výrazněji, a to v rozmezí 19,3 %. Nástroje s PKD se tedy projeví jako vhodnější pro vytvoření identické struktury po celé měřené délce otvoru. Hodnota parametru  $R_p$  se se změnou řezné rychlosti ani s použitým druhem materiálu vodítek výrazně nelišila. Tuto skutečnost lze přičíst kalibrovacím břitům na válcové části nástroje, které pracují na principu Wiper známém z nástrojů pro soustružení a frézování pro dosahování lepší kvality profilu povrchu při stejných řezných podmínkách jako u běžných nástrojů. Výraznější výstupky jsou tedy na profilu povrchu zahlazeny nebo odřezány těmito břity. Výraznější změna hodnot  $R_p$  se projevila až s rozvojem opotřebení u nástrojů s PKD, kdy nástroj již vykazoval známky abrazivního otěru na vodítkách i na břitech nástroje.

Dalším zásadním hodnoceným parametrem byl nosný podíl profilu povrchu  $R_{mr(c)}$ . Tento parametr vykazoval vyšší hodnoty u nástrojů s vodítky z cermetu již u nového nástroje. U nástrojů byl zaznamenán trend tvaru průběhu hodnot s rozvojem opotřebení ve tvaru U. Povrch obrobený novým nástrojem vykazoval hodnoty  $R_{mr(c)}$  kolem 50 %. V I. fázi zrychleného opotřebení povrch vykazoval pokles hodnot až na  $R_{mr(c)} = 40 \%$ , zatímco v polovině životnosti a na konci životnosti nástroje byly naměřeny hodnoty od 55 do 57 % hodnoty  $R_{mr(c)}$ .

Dalším výstupem práce je odvození vztahu rozvoje průřezu třísky  $A_D$  uvažované geometrie nástroje v čase  $t$ . Na základě uvedeného odvozeného vztahu, při dodržení stanovených předpokladů (lineární břity se spojitostí G0), lze při změně geometrie odvodit čas potřebný pro stabilizaci nástroje v prvotní fázi zavádění. Změnou geometrie lze také docílit odklonění působení největšího mechanického tlaku na kritické místo nástroje, tedy hranu mezi břitem a kalibrovacím břitem. Během procesu vystružování bylo v dílčí studii autora [11] prokázáno zpevnění povrchu, avšak nebylo uvedeno, zda je u této operace, po které následuje proces válečkování,



toto zpevnění nezbytné a žádoucí. V případě přenesení maximálních tlaků do oblasti, která se bezprostředně nepodílí na utváření finálního profilu povrchu, by bylo teoreticky možné prodloužit životnost nástroje. Změna geometrie nástroje by také vedla k přesunutí výslednice radiálních sil do axiálního směru vůči ose nástroje, což by vedlo ke snížení radiálního zatížení při zařezávání břitů do obrobku v okamžiku, kdy se na stabilizaci nástroje ještě nepodílí vodítka.

Během realizace dílčích experimentů byla dále prokázána velmi zásadní závislost nástroje na intenzitě a směru proudění procesních kapalin. Tribologie nástroje vůči obrobku je na mazacím účinku procesní kapaliny velmi závislá. Toto prokázala experimentální měření (v dizertační práci uvedená na obr. 5.14.), realizovaná na stroji Tajmac ZPS MCV 1210 s externím prouděním procesních kapalin, kdy ve 2. fázi obrábění (stabilizované oblasti) docházelo ke skokovému nárůstu hodnot  $F_f$ . Nárůst hodnot o téměř 15 N byl vyhodnocen jako ztráta účinku procesní kapaliny, která se již nedostávala v dostatečném množství do požadované oblasti obrábění. V dizertační práci na obr. 5.16. je pak uveden záznam z realizovaného experimentu, kde bylo použito doporučené vnitřní chlazení.

Práce ve své koncepci navrhla možnou metodiku testování a hodnocení zásadních silových veličin. Na základě algoritmu hodnocení silového zatížení a výsledné struktury povrchu by bylo možné vytvořit software nebo i xlms soubor, který by na základě změny nastavené geometrie nástroje predikoval velikost a výslednici případného silového zatížení. Data získaná během realizovaných experimentů a vyhodnocená v této práci je dále možno využít pro testování soustavy upínač – termoupínač – nástroj s pomocí MKP analýzy, kde by bylo možné simulovat chování nástroje, např. vychylování během procesu zavádění do obrobku. Naměřená data a poznatky mohou být dále využity pro simulace utváření třísky, vedoucí ke zjištění napjatostních stavů v povrchu materiálu po procesu vystružování.

Předpokládaný další výzkum na tomto typu nástroje by bylo vhodné zaměřit na tribologické vlastnosti moderních PVD povlaků v kombinaci s procesními kapalinami a zejména na způsob jejich přívodu do místa řezu, dále pak na možnost změn řezné geometrie pro dosažení snížení radiálních sil působící na nástroj v I. fázi obrábění pro eliminaci přetěžování vodítek právě v okamžiku prvotní stabilizace nástroje. Další bod následného výzkumu by bylo vhodně zaměřit na změnu koncepčního uspořádání návaznosti břitů a vodítek nástroje pro zkrácení destabilizované oblasti hodnot v I. fázi obrábění. Z realizovaného výzkumu vyplynula přímá souvislost přetížení nástroje v I. fázi vystružování s rozvojem abrazivního opotřebení na vodítcích nástroje.



## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BUDA, Ján a Ján Békéš. *Teoretické základy obrábania kovov*. Bratislava: Vydavateľ ALFA, 1977. 63-005-74.
- [2] BUMBÁLEK, Bohumil a Leoš Bumbálek. *Rozměrový účinek a jeho význam při vysoce přesném obrábění*. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, [vid. 2011-04-12], 10 s
- [3] BUMBÁLEK, Bohumil. *Fyzikální podstata řezání* [online]. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005 [vid. 2011-04-12], 125 s. Dostupný z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/fyz\\_pods\\_rez/Opora05\\_Fyzikalni\\_podstata\\_rezani.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/fyz_pods_rez/Opora05_Fyzikalni_podstata_rezani.pdf).
- [4] BUMBÁLEK, Bohumil. *Vysoce přesné metody obrábění a jejich fyzikální podstata*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2004.
- [5] BUMBÁLEK, Leoš. *Deformační chování materiálu při řezání se zaměřením na přesné obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 224 s. ISBN 80-720-4325-0.
- [6] ČERMÁK, Jaroslav. *Soudobé otěruvzdorné povlaky a jejich vliv na efektivní využití řezných nástrojů ze slinutých karbidů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009. 30 s. ISBN 978-80-214-3901-6.
- [7] CHLUP, Martin. *Hodnocení průběhu silového zatížení při vystružování za použití moderních vystružovacích hlavic MT3 v závislosti na integritě povrchu*. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Slaný.
- [8] De CHIFFRE, Leonardo, TOSELLO, Guido, PÍŠKA, Miroslav and Pavel MÜLLER. *Investigation on capability of the reaming process using minimal quantity lubrication*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. Volume 2, Issue 1, 2009. Pages 47-54, ISSN 1755-5817.
- [9] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [10] HAM-Final: firemní databáze. *Testování vystružovacích hlavic MT3 - Cermet a PKD*. Testování proběhlo dne: 6. 1. 2012.

- [11] HAVLÍK, Luboš. *Integrita povrchu při vystružování s využitím vystružovací hlavice MT3*. Brno 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 88 s. přílohy 3. Vedoucí práce Ing. Karel Kouřil, Ph.D.
- [12] HUMÁR, Anton. *Technologie obrábění I: Studijní opory* [online]. Brno, 2003 [vid. 2013-06-26]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf)
- [13] JEMIELNIAK, Krzysztof. *Rough turning of Inconel 718. Advances in Manufacturing, Science and Technology*, 2009, 33.3: 5-15.
- [14] KOČMAN, Karel. a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM Brno s.r.o., 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [15] KOLÁŘ, Petr. *EMO Hannover potřetí – brousící stroje. MM Průmyslové spektrum*. [Online] 2007. [vid.: 16. 6 2010.] Dostupné z.: <http://www.mmspektrum.com/clanek/emo-hannover-potretri-brousici-stroje.html>.
- [16] KOPAČ, Janez a Antun STOJIC. *Cutting Disturbances in Hard Turning Process*. Barcelona - Lloret de Mar : Příspěvek na konferenci "Trends in the Developement of Machinery and Associated Technology", 2006.
- [17] KOPAČ, Janez; STOIC, Antun; LUCIC, M. *Experimental investigation of dynamic instability of the turning process*. Archives of Computational Materials Science and Surface Engineering Selected full texts, 2009, 1.2: 84-91.
- [18] KOPAČ, Janez; STOIC, Antun; LUCIC, Mirjana. *Dynamic instability of the hard turning process*. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2006, 17.1-2: 373-376.
- [19] KOUŘIL, Karel a Stanislav FIALA. *Moderní nástroje pro dokončování děr. mmspektrum*. [Online] MM Průmyslové spektrum, 4 2007. [vid.: 1. 6 2013.] Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-nastroje-pro-dokoncovani-der.html>.
- [20] KOUŘIL, Karel, a Vladimír VAŇEK. *Obrábění přesných děr v litinách. mmspektrum*. [Online] MM Průmyslové spektrum, 4 2009. [vid.: 20. 5 2010.] Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-presnych-der-v-litinach.html>.

- [21] KOVÁR, Libor. *Hodnocení deformačního chování materiálu při řezání na základě stability a nestability plastické deformace a smykového napětí v primární oblasti plastické deformace*. VUT FSI, 2001, 94 s.
- [22] KUPCZYK, Maciej, JOZWIAK, Krzysztof, et al. *Influence of laser heating on adhesion of CVD coatings to cutting edges*, *Surface and Coatings Technology*, Volume 201, Issues 9–11, 26 February 2007, Pages 5153-5156, ISSN 0257-8972.
- [23] MADAJ, Martin, Josef, SEDLÁK, Martin, SLANÝ a Aleš POLZER. *Cutting Tool Performance and Geometrical Analysis of Progressive HSS Drills*. Trenčín: Digital Graphic, 2008. ISBN 978-80-8075-357-3.
- [24] MADAJ, Martin, SLANÝ, Martin a Josef SEDLÁK. *Cutting Tool Performance Analysis of New Drilling Tools*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008. ISBN 978-80-214-3834-7.
- [25] MADAJ, Martin. *Vývoj výkonných vrtacích nástrojů s využitím CAD/CAM a analýzy mechanismu tvorby třísky*. Pojednání k získání akademického titulu Doktor (Ph.D.) ve studijním programu (oboru) Strojírenská technologie. Školitel: prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. Brno 2010
- [26] MERCHANT, M. Eugene. *Mechanics and Metal Cutting Process II., Plasticity Conditions in Orthogonal Cutting*. J. Appl. Physics, 1945.
- [27] MERCHANT, M. Eugene. *Mechanics of Metal Cutting Process I*. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2005, xix, 651 s. ISBN 01-951-4206-3.
- [28] MÜLLER, Pavel. *Minimum Quantity Lubrication in Reaming*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2008.
- [29] PÍŠKA, Miroslav, SLANÝ, Martin, MADAJ, Martin a Aleš POLZER. *Vliv procesních kapalin na aktivní a pasivní silové složky při vrtání, řezání závitů a vystružování*. Technický týdeník, Vol. 2010, (2010), No.2, pp.13-17, ISSN 0040-1064, Česká strojnická společnost. Článek v časopise. Akce: Mazání v moderním průmyslovém podniku, Nové Město na Moravě, 28. 04. 2010 - 29. 04. 2010.
- [30] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vysoké učení technické v Brně: Akademické nakladatelství CERM,s.r.o. Brno, 2009. 247 s. Učební texty vysokých škol. Vysoké učení technické v Brně. ISBN 978-80-214-4025-8.

- [31] RYBAŘÍK, Jaromír. *Vliv rozměrového účinku na integritu povrchu při vystružování s využitím moderní vystružovací hlavice MT3*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Slaný.
- [32] SCHMEIDER, George. *Cutting Tool Applications*. Soutfield: gmrs@hotmail.com, 243 s. ISBN 06-151-2191-8.
- [33] SHAW, Milton Clayton. *Metal cutting principles*. 2nd ed. Oxford University Press, 2005, xix, 651 s. ISBN 01-951-4206-3.
- [34] SLANÝ, Martin a Martin MADAJ. *Analýza řezivosti tříbřitých vrtacích nástrojů*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2010. ISBN 978-80-214-4116-3.
- [35] STAHL, Jan-Eric. *Metal Cutting Theories and Models*. 1. vyd. Sweden, Lund: Elenders, 2012, 580 s. ISBN 978-91-637-1336-1.
- [36] ZETEK, Miroslav, KŘÍŽ, Antonín a Josef ŠKARDA. *Řezné síly při vrtání těžkoobrobitelných materiálů o vysoké pevnosti a tvrdosti*. České Budějovice: Příspěvek na Mezinárodní konferenci při příležitosti 55. výročí založení fakulty strojní VŠB-Technická univerzita, 2005.
- [37] ZOUHAR, Jan. *Vývoj výkonných frézovacích nástrojů s využitím CAD/CAM a analýzy mechanismu tvorby třísky*. Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2009. 104 s, 7s příloh. Vedoucí disertační práce Doc. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.
- [38] ZOUHAR, Jan. *Vývoj výkonných frézovacích nástrojů s využitím CAD/CAM a analýzy mechanismu tvorby třísky*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2008.
- [39] BALZERS. *EN\_CUT.MPG: Slowmotion videospot. Studijní materiály pro vyuuku předmětu: Experimentální technologie obrábění na VUT v Brně*. 2006.

# CURRICULUM VITAE

## Osobní údaje

Jméno a příjmení: Martin Slaný  
Datum narození: 21. 7. 1979  
Místo narození: Brno  
E-mail: slany.m@fme.vutbr.cz

## Vzdělání probíhající

2006 – dosud FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie – odbor Technologie obrábění. Doktorský studijní program D4T–K Strojírenská technologie, obor D–STG Strojírenská technologie.

## Vzdělání dosažené

2003 – 2006 FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie – odbor Technologie obrábění. Magisterský nástavbový studijní program N2301-2 Strojní inženýrství, obor N2307-01 Strojírenská technologie. Získaný titul Ing.

2000 – 2003 FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie – odbor Technologie obrábění. Bakalářský studijní program B2341-3 Strojírenství, obor Strojírenská technologie. Získaný titul Bc.

1996 – 1998 Integrovaná střední škola – centrum odborné přípravy, Olomoucká 61, Brno. Nástavbové studium, obor 24 – 96 – 4 Podnikání v oboru strojírenství, ukončeno maturitní zkouškou.

1994 - 1996 Integrovaná střední škola – centrum odborné přípravy, Olomoucká 61, Brno. Obor 24 – 23 – 2 Nástrojař, zaměření: univerzální, ukončeno odbornou zkouškou a výučním listem.

## Zaměstnání a pracovní zkušenosti v oboru

2007 – dosud Strojírenský technik – technický pracovník, FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie odbor Technologie obrábění.

## **Zaměstnání a pracovní zkušenosti mimo obor**

1996 – dosud	Externí pracovník – dobrovolník v SVČ Lužánky Brno. Vedoucí zájmové činnosti.
1996 – 2011	Oddílový vedoucí, hospodář a zdravotník na letních zotavovacích akcích a na letních táborech organizovaných pod záštitou SVČ Lužánky Brno.
2011 – dosud	Hlavní vedoucí na letních táborech a zotavovacích akcích. Externí pracovník – DPP pro SVČ Lužánky Brno.

## **Pedagogická praxe v oboru**

DTB – Technologie obrábění  
EAC – Aplikace CAD/CAM v technologii obrábění  
HE1 – Experimentální metody  
HNE – Nekonenční technologie obrábění  
MGM – Geometrické modelování  
3VT – Výrobní technologie II

## **Znalosti software**

Kancelářské:	MS Windows, MS Office (Word, Excel, PowerPoint), Mozilla Thunderbird, Mozilla Firefox, Opera, Chrome, Adobe Acrobat Profesional.
Grafické:	Photoshop, Corel Draw, Photo Paint.
CAD:	Autodesk Inventor, SolidWorks, AutoCAD, Catia (základní znalost), Eagle.
CAM:	PowerMill, HSM Works.
Zpracování videa:	PinnacleStudio, MS Movie Maker.
Řídicí systémy:	Sinumeric 810D, Sinumeric 840D, Heidenhain iTNC 530.
Programování:	Visual Studio – programování v jazyce C.

## **Zájmy**

Elektrotechnika, programování, konstrukce a výroba hobby CNC strojů, letecké modelářství, organizace letních táborů a zotavovacích akcí, vedení zájmové činnosti – železniční modeláři v SVČ Lužánky Brno, organizace team building akcí, cestování a další.

## ABSTRAKT

Dizertační práce se zaměřuje na hodnocení moderních obráběcích nástrojů, zejména pak nástrojů pro dokončovací operace, u kterých je hodnocen vliv pasivních silových složek na obráběcí proces. Práce se bude podrobně zabírat analýzou vzniku třísky a ději, které tento proces doprovází a zásadním způsobem se podílí na vzniku nového povrchu.

V experimentální části je podrobně analyzován záznam průběhu silového zatížení u nástroje MT3. Jedná se o vystružovací hlavici určenou pro dokončování děr za vysokých řezných rychlostí ( $100 - 200 \text{ m.min}^{-1}$ ) při úběru třísek s malým průřezem  $A_D$  ( $0,024 \text{ mm}^2$ ). Zvláštní pozornost je věnována hodnocení profilu nově vzniklého povrchu po obrábění a hodnocení změny geometrie a zatížení břitu, které se zásadním způsobem promítá do vzniku a rozvoji pasivních sil.

## Abstract

This dissertation thesis focuses on the evaluation of modern machine tools, especially tools for finishing operations, with which the effect of the passive force components on the machining process is evaluated.

The thesis will examine the analysis of creating chips and circumstances that accompany this process and substantially involve the formation of a new surface.

The analysis of the process of the recording of the power load of the MT3 tool takes place in the experimental part of the thesis. MT3 is a reaming head intended for finishing holes at high cutting speeds ( $100 - 200 \text{ m.min}^{-1}$ ) with removal of small cross section  $A_D$  ( $0.024 \text{ mm}^2$ ) chips. Particular attention is paid to the newly created profile from the surface after machining and evaluation of changes in geometry and loading of the cutting edge, which is significantly reflected in the establishment and the development of passive forces.